国际放射性废物处置政策及经验启示

吴宜灿[1*] 赵永康[2] 马成辉[3] 徐春艳[4] 王明煌[1] 付雪微[1] 邹小亮[1] 夏 凡[1] 王 芳[1] 周 涛[1] 胡丽琴[1]

1 中国科学院核能安全技术研究所 中子输运理论与辐射安全重点实验室 合肥 230031
2 生态环境部华北核与辐射安全监督站 北京 100029
3 生态环境部华南核与辐射安全监督站 深圳 518034
4 生态环境部核与辐射安全中心 北京 100082

摘要 我国已经形成较为完整的核工业体系，但随着核能的发展，产生和积存的放射性废物总量不断增多，放射性废物的处置能力与核能的发展不相匹配，废物超期贮存所引起的安全、社会和环境等问题日益突出。通过对美国、法国等核电装机容量高、在放射性废物处置方面有着丰富经验的国家进行调研分析，分别从政策及立法、监管及实施、资金筹措及激励措施3个方面将我国放射性废物管理体系与国际进行对比，给出对我国放射性废物管理体制与机制的经验启示，并提出了完善我国放射性废物管理体制与机制的建议。

关键词 放射性废物处置，放射性废物管理，废物处置政策

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20191210001

《中华人民共和国放射性污染防治法》规定，放射性废物是指含有放射性核素或者被放射性核素污染，其浓度或比活度大于国家确定的清洁解控水平，预期不再使用的废弃物[1]。放射性废物来源众多且复杂，活度范围大，寿命长短差异大，其潜在危害可能持续上百年、上万年甚至更久。包容与隔离是放射性废物管理的首选策略，即把放射性核素限制在废物基质、包装和处理设施内，并将其与人类直接生活的环境隔离。放射性废物处置是人类社会的长期挑战，其与核事故并列为核能安全发展的两大制约因素，受到各国的广泛重视。

我国已经形成较为完整的核工业体系，积存和产生的放射性废物总量不断增多，废物超期贮存所引起的安全、社会和环境问题日益突出。以核电站产生的低放废物为例：我国核电机组在役47个、在建11个，而且还在增加[2]。按每个机组年产生低放射性固体废物50立方米（整备后）计算，到2020年，每年将产生低放射性固体废物约3 000立方米。另外，截至2018年12月31日，全国从事生产、销售、使用放射性同位素和射线装置的单位共73 070家，在用放

*通讯作者
资助项目：国家核安全局核与辐射安全监管项目（JD201929）
修改稿收到日期：2019年12月26日

射源 142 607 枚，各省、自治区、直辖市城市放射性废物库已收贮废旧放射源 58 814 枚，已转运或收贮至国家放射源集中暂存库及由生产厂家回收的废旧放射源共 143 101 枚，管理面临压力[3]。

我国目前低放废物区域处置场选址落地困难，中放废物处置未启动，高放废物处置处于地下实验室建设阶段。在低放废物处置方面，我国已建成的西北、北龙和飞凤山 3 个近地表处置场中，西北处置场接收了来自秦山核电厂的低放废物，北龙处置场暂存了来自大亚湾和岭澳 2 个核电厂的低放废物。我国放射性废物的处置能力与核能发展不相匹配，如果该问题得不到妥善解决，将阻碍我国核能事业的可持续发展。

本文通过对美国、法国等核电装机容量高、在放射性废物管理方面有着丰富经验的国家进行调研分析，分别从政策及立法、监管及实施、资金筹措及激励措施 3 个方面将我国放射性废物管理体系与国际进行对比，给出对我国放射性废物管理体制与机制的经验启示，并提出完善我国放射性废物管理体制与机制的建议，以促进放射性废物管理工作进展，适应核能发展需求，保障环境安全与人类健康。

1 国际放射性废物管理现状

本文调研了美国、法国、俄罗斯、加拿大、日本、韩国、英国在放射性废物管理方面的现状，考虑到美国、法国放射性废物处置率高，处置经验丰富，且与我国放射性废物的来源途径与规模具有相似性，因此着重对这两国的情况进行了介绍。

1.1 政策及立法

完善的法律、法规、标准体系是放射性废物处置工作的重要依据。美国、法国等核能大国均已建立了适应自身需求的法律、法规、标准体系。特别是在法律制定层面，除了服务于核能发展的基本法，它们还都建立了针对放射性废物管理的专门法（表 1）。国家政策来源于各国法律法规体系对放射性废物处置的规定，各国一般都秉持以下原则制定相关政策：① 谁产生谁负责；② 安全是前提条件；③ 放射性废物最小化；④ 分类处理处置；⑤ 政府负责监管；⑥ 监督和实施相互独立；⑦ 鼓励公众参与。

（1）美国。该国的立法体系由法律、联邦法规、导则构成。联邦立法首先由国会通过，然后由总统签署成为法律。美国主要涉及放射性废物管理的法律包括《原子能法》《核废物政策法修订案》《低水平放射性废物政策法修订案》《能源政策法》等。在联邦法规方面，形成了系统化的法规体系，对于美国核管理委员会（NRC）、美国能源部（DOE）和美国环境保护署（EPA），适用的总法规包含在每年出版的《美国联邦法规》（Code of Federal Regulations，CFR）的标题10（用于 NRC 和 DOE）和标题 40（用于 EPA）中[4]。美国的放射性废物分为非政府活动产生的商业废物和政府活动产生的废物两类。其中，商

表 1　各国涉及放射性废物管理的代表性法律

国家	法律名称	颁布时间
美国	《原子能法》	1946 年
	《低水平放射性废物政策法修订案》	1985 年
	《核废物政策法修订案》	1987 年
	《能源政策法》	1992 年
法国	《放射性废物法》	1991 年
	《核透明与安全法》	2006 年
	《放射性废物规划法》	2006 年
俄罗斯	《放射性废物管理和对一些现行联邦法律的变更》	2011 年
日本	《最终处置法》	2000 年
韩国	《放射性废物管理法》	2009 年
	《核安全法》	2011 年
英国	《核装置法修正案》	1965 年
	《放射性物质法》	1993 年
	《能源法案》	2013 年
加拿大	《核安全和控制法》	2000 年

业低放废物及设施由各州政府负责管理，即通过《低放废物政策法》，在协议州框架下进行处置或进行全国性集中处置。超C类废物、超铀废物和高放废物的处置则由美国联邦政府负责，具体由DOE承担[5]。

（2）法国。该国的立法体系由法律、法规、规章、导则构成。涉及放射性废物管理的法律主要有《放射性废物法》《核透明与安全法》《放射性废物规划法》《废物处置和材料回收法》等。按照废物分类方法的不同，法国制定了详细的管理策略。按照设施类型和放射性核素种类，法国工业部、卫生部和环境部的联合法令规定了一个限值，超过该限值的设施被称为“基础核设施”（basic nuclear installation），低于该限值的被称为“环境保护分类的设施”（installations classified on environmental protection grounds）[6]。对于基础核设施，《废物处置和材料回收法》（“75-633号法”）规定了放射性废物最终处置前后，生产者都应承担相关责任；另外，还制定了一系列技术规章，包括技术规定和基本安全规章，以确保废物得到有效管理。对于环境保护分类的设施，其适用的法律在《环境保护法》第5卷第1部分。对于放射源，其适用的基本规章在《公众健康法》第6章第4部分[7,8]。法国放射性废物管理的特点是即使生产者将废物运送到另一家公司运营的设施进行处理或贮存，生产者仍然负有责任。

1.2 监管及实施

放射性废物管理一般秉承监督与实施相互独立的原则，各国都设立了独立的监管机构（表2）[9-11]。核设施产生的放射性废物根据类别差异，不同国家有各自的处置实施方式。对高放废物处置，一般由政府或政府所属部门专门成立的具有商业性质的实施机构负责。对低放废物的处置，有的由政府或政府所属部门专门成立的实施机构处理，有的由商业公司处理（表3）。对于政府专门成立的实施机构，一般是国家、国家所属部门或国家公共机构直接负责或监督，如美国DOE下属的环境管理办公室（Office of Environmental Management）和核能办公室（Office of Nuclear Energy）、法国国家放射性废物管理局（ANDRA）、英国核退役管理局（NDA）[12]①、韩国放射性废物管理机构（KORAD）[13,14]、日本核废物管理组织（NUMO）②等。对于商业公司实施方式，一般由核能公司（或政府与核能公司一起）组建放射性废物管理专营机构，机构的职责范围根据各国的具体情况制定，如加拿大核废物管理组织（NWMO）③、俄罗斯放射性废物管理国家运营商（NO RAO）和国有放射性废物管理企业（Ros RAO）等[15]。

（1）美国。参与放射性废物监管或实施的机构有NRC、EPA、DOE、国防核设施安全管理局（DNFSB）及各州政府。NRC主要履行监管职责，颁发管理许可证，还对非军事应用产生的商业低放废物负有管理责任。EPA主要履行环境监管，负责颁布和执行辐射防护标准。DOE负责管理自身产生的核废物以及全国的超C类废物、超铀废物和高放废物，具体由DOE下设的环境管理办公室和核能办公室来实施，并对厂址退役实行军民分开管理[16,17]。DNFSB是美国国会建立的独立联邦机构，对由DOE制定的国防核设施设计、建设、运行和退役的安全健康标准进行内容和实施情况的审核和评估[18]。针对商业低放废物处置，根据1985年的政策法修订案，其监管和实施主体均下放到州，由州政府指定的部门负责，包括颁发许可证。

（2）法国。根据《核透明与安全法》，基础核设施受核安全局的监管，其申请建造许可证必须通

① NDA. About us. https://www.gov.uk/government/organisations/nuclear-decommissioning-authority/about, 2018.
② NUMO. Overview of NUMO and its Activities. https://www.numo.or.jp/en/about_numo.
③ NWMO. About us. https://www.nwmo.ca.

表 2　各国放射性废物监管机构

国家	核安全监管机构	其他管理机构	许可证发放
美国	NRC	DOE、EPA、DNFSB及各州政府等	NRC及各州政府
法国	法国核安全局（ASN）	法国环境保护部等	法国总理
俄罗斯	俄罗斯环境、技术和核监督局（Rostechnadzor）	俄罗斯消费者权益保护和人类福利监督局（Rospotrebnadzor）等	Rostekhnadzor
加拿大	加拿大核安全委员会（CNSC）	加拿大自然资源局（NRCan）等	CNSC
日本	日本核监管局（NRA）	日本原子能机构（JAEA）等	NRA
韩国	韩国核安全和安保委员会（NSSC）	韩国贸易、工业和能源部（MOTIE）等	NSSC
英国	英国核监管局（ONR）	英国环境局（EA）等	ONR

表 3　各国放射性废物处置实施机构

国家	高放废物处置	低放废物处置
美国	DOE下属环境管理办公室和核能办公室	商业公司负责运营，含3个协议州处置设施和1个非协议州市场化运作的全国性集中处置设施
法国	ANDRA——从法国原子能与替代能源委员会（CEA）中独立出来的公共机构；接受环境、能源和研究部门监督	
俄罗斯	Ros RAO负责运输、储存和整备，NO RAO负责处置；两者都是俄罗斯国家原子能公司（Rosatom）的子公司，对俄罗斯工业和能源部（MIE）和俄罗斯经济和贸易部（MEDT）负责	
加拿大	NWMO——由核电公司成立	核电公司、加拿大原子能有限公司（AECL）和铀矿企业自行处置
日本	NUMO——属于日本经济、贸易和工业部（METI）管辖	10家电力公司联合组建日本原燃株式会社（JNFL）负责
韩国	KORAD——属于韩国贸易、工业和能源部（MOTIE）管辖	
英国	NDA——其全资子公司放射性废物管理公司（RWM）负责高放废物处置；低放废物处置公司LLWR代表NDA管理国家低放废物处置库，并监督国家低放废物计划；NDA属于英国商业、能源和工业战略部（BEIS）管辖	

过总理签署的法令颁发，并由负责核安全的部长签署；环境保护分类的设施由承担环境保护责任的部长监管。法国 ANDRA 作为负责军民放射性废物管理的实施机构，其下设用于高放废物处置的工业地质处置中心 Cigeo 和中、低放废物处置库[19]。对高放废物的处置，ANDRA 负责处置库的选址、建造、运行、关闭及其他相关研究，经费主要来源于废物生产者为高放废物设立的独立账户。对低放废物的处置，ANDRA 每 5 年与废物产生单位签订废物处置协议，通过签订商业合同收费[20]。对极低放废物的处置，其被划分为环境保护分类的设施，但也由 ANDRA 处置运营，由设施所在地的省级政府管理。

1.3 资金筹措与激励措施

高放废物处置和核设施退役资金是为保障核电站业主在履行未来核责任时有足够的资金而预先征收的准备金/基金，这些资金的征集实质上是一种将能源生产和消费的某些社会成本内置化的机制。各国高放废物处置资金以及核设施退役资金的筹措与管理的办法如表 4 所示。低放废物由于处理技术相对成熟，处理周期短，一般由处置场运营商与废物产生单位签订商业付费合同。为保证交易的公平公正，一般需要处置场运营商与废物产生单位协商制定收费标准并通过政

表 4　部分国家高放废物和核设施退役资金的筹措与管理办法

国家	高放废物处置资金	核设施退役资金
美国	成立核废物基金（NWF），向废物生产者收费；基金纳入国家财政预算管理，由DOE实施，保值方式为投资国债	废物生产者建立独立于企业资产的专门基金，第三方信托公司管理，NRC详细规定了投资范围（例如，所选信托公司的穆迪评级至少是“BBB”）
法国	废物生产者建立单独账户的企业内部准备金，国家多方监督以保证专款专用，企业承担增值的义务（45%股票+55%债券）	
加拿大	废物生产者定期将资金存入各自独立的信托基金，由第三方信托公司管理，其投资政策与程序有详细规定	运营商提供所有退役活动的资金担保，该资金作为单独专用基金，或以省级担保资金形式存在
英国	成立英国核责任基金（NLF）[21]，由核电公司提供资金，由国家和核电公司共管；大部分投资于其财政部的国家贷款基金，其他投资于更为自由的增长基金	

府相关部门的审批。

为解决“邻避效应”问题，很多国家制定了适当的激励措施，以推动废物处置的进程。例如，加拿大采用“物业价值保护计划”（PHAI）进行经济激励，对加拿大高放废物深地质处置库（DGR）进行约 3 000 万美元的经济激励。韩国在没有对激励政策实施立法之前，1986—2004 年的 18 年间经历了 9 次选址失败，中、低放废物处置设施及乏燃料贮存设施迟迟不能落地。2005 年 3 月，韩国制定《放射性废弃物处置设施特别法》并成立选址委员会，确定了具体的激励措施；到同年 11 月，经居民投票选定庆州市作为场址，仅仅历时 8 个月。

1.3.1 美国

美国高放废物处置费用属于“国家预算内”基金，由高放废物的生产者和拥有者承担。美国国会根据 1982 年《核废物政策法》设立了 NWF，由美国能源部部长管理执行。该基金经费主要来源包括：商用高放废物处置费用由联邦政府按每 1 度核能发电量摊付 0.1 美分的乏燃料处置费向电力公司筹集，而国防高放废物处置费用由国会拨款。

美国核电站退役费用属于“国家预算外”基金，完全由核电厂业主承担，联邦政府不给予补贴。核电站退役基金是根据联邦法规《退役计划的报告和记录保存》（10 CFR 50.75(C)）的第 10 条，NRC 要求核电站许可证持有人每年调整对核电站退役成本的估计。费用概算总额的调整可通过以下方式表示：

$$\text{退役费用}(x\text{年}) = [1986\text{年基值}] \times [A \times Lx + B \times Ex + C \times Bx]。$$

其中，A、B 和 C 分别是代表 1986 年美元总成本的百分比，分别用于劳动力（0.65）、能量（0.13）和处置（0.22）；*Lx*、*Ex* 和 *Bx* 分别是劳动力成本增长因子、能源成本增长因子和处置成本增长因子[22]。

美国低放废物处置模式分为协议州处置和非协议州处置两类。目前，按协议州模式运行的低放废物处置设施有 3 个，分别位于得克萨斯州、南卡罗来纳州和华盛顿州。其中，得克萨斯州的 Andrew 处置场较为特殊，它既能接收协议州的废物，也能接收非协议州的废物，但来自非协议州的废物不能超过处置场容量的 30%。犹他州 Clive 处置场按非协议州处置模式运行。数据显示，2017 年美国在犹他州通过非协议州模式处置的废物总量占全美处置总量的绝大部分，而协议州处置模式处置量相对较少。美国的商业低放射性处置场费用定价，均是由其所在州相关管理部门负责。

美国政府还制订了一系列激励措施以解决当地政府和居民的“邻避效应”问题。《综合环境响应、赔

偿和责任法》建立了比较完善的有害物质污染的响应、责任、补偿机制，确立了超级基金制度和综合补偿政策。对于高放废物，《核废物政策法修订案》授权 DOE 每一财政年度支付一笔费用给处置场所在州或地方政府，其数额按 DOE 商业活动的税率计算。例如，尤卡山处置场选址、建造和运行过程中，每年为尤卡山提供 1 000 万美元作为激励；在处置库运行期间，每年提供 2 000 万美元作为激励。对于低放废物，《低水平放射性废物政策法修订案》允许各协议州收取附加费，用于减轻对低放废物处置场所在州的影响[23]。例如，美国中西部州际协作体、东南部州际协作体、中央州际协作体、东北部州际协作体都采取了为所在地居民房地产价值担保，实行免税等一系列激励措施。

1.3.2 法国

*法国法律明确了放射性废物处置的费用筹措及管理责任。*法国《放射性废物规划法》通过界定各利益相关者的责任，成立了基础核设施退役和乏燃料及放射性废物管理国家财务评价委员会（CNEF）。由经济和能源部负责监管废物生产者的费用支付情况，包括废物生产者的长期责任、债务支付的方法和选择；由 CNEF 负责评价经济和能源部的工作开展情况，并每 3 年向议会汇报。针对高放废物管理与退役资金保障，法国《环境法》规定了一项围绕长期核费用融资的制度。核设施持证单位需要评估长期的费用，包括核设施退役费用、乏燃料和放射性废物管理费用，并设立受保护的专用资金为未来核废物处置做准备。除非通过了国家的许可，专用资金不得用于任何其他目的，也不得用于还债（即使持证单位遇到财务困难），以确保持证单位履行其在退役和放射性废物管理方面的义务。针对非高放废物管理的资金保障，法国极低放废物和短寿命中低放废物分别集中在奥布省的 Morvilliers 处置库（Cires）和 Soulaines-Dhuys 处置库（CSA）进行近地表处置，并均由 ANDRA 运营。放射性废物的生产者与 ANDRA 之间通过签订合同并付费，然后将合乎处置标准的废物送到相应的处置场进行处置。

*法国通过税收保障放射性废物的妥善处置，*包括基础核设施税、放射性废物附加税（即“研究”税、“经济激励”税和“技术扩散”税）以及用于放射性物质和废物的可持续管理的特别缴款等。除此之外，法国法律授权由核电运营商直接为当地政府提供激励。例如：Bure 项目中为默兹和上马恩 2 个省提供 3 000 万欧元/年；奥布省项目建造期间，累计经济补偿达到 880 万欧元，建成后为当地社区提供了新的就业机会、税收等，为当地带来了巨大效益。

2 我国放射性废物管理现状及存在问题

2.1 政策与立法

我国放射性废物管理采用分类管理原则，由生产者负责，并要求放射性废物的产生量和向环境的排放量遵循 ALARA 原则：对于高放废物，采用集中深地质处置；对于中放废物，采用中等深度处置；对于低放或极低放废物，进行近地表或填埋处置。我国已颁布的与放射性废物管理相关的法律主要有《核安全法》[24]和《放射性污染防治法》；此外，还有《放射性废物安全管理条例》《放射性废物的分类》[25]等 60 余项法规、部门规章、国家标准、行业标准和技术导则，对我国的放射废物处置做了规定。相比于本文调研的大部分国家，我国尚没有针对放射性废物管理的专门法律，而且对于现行相关法律的落实，还亟待加强。

2.2 监管与实施

我国遵循监管独立的原则，已经建立了分工明确的放射性废物监管体系。我国放射性废物管理安全涉及的监管机构有生态环境部（国家核安全局）、国家卫生健康委员会、公安部和应急管理部。生态环境部（国家核安全局）统一负责全国放射性废物的安全监

督管理工作。国家卫生健康委员会和其他有关部门依据国务院规定的职责，对有关的放射性废物管理工作依法实施监督管理。

国防科工局是我国放射性废物主管部门，负责放射性废物处置的实施工作。目前，我国高放废物处置地下实验室建设项目已经获国务院批复，但高放废物处置工作缺乏专门的实施机构；中放废物处置工作未启动；对低放废物，1992年国务院印发的《关于我国中、低水平放射性废物处置的环境政策》，提出了区域处置政策[26,27]，但是到目前为止，区域处置场选址落地困难，“邻避效应”问题严重。

2.3 资金筹措与激励措施

我国《放射性污染防治法》《核安全法》等都明确提出了放射性废物处置以及核设施退役资金的筹措原则。对于国防、军工用途产生的放射性废物，其处置场的建设和运行费用由国家支付；对于商业过程产生的放射性废物，则由其生产者付费。在放射性废物产生单位运行过程中，每年需要提取一定的资金，留作核设施的最终退役及其放射性废物处置的费用。我国虽然规定了资金筹措的基本原则，但是对于费用的估算、提取、管理、监督和使用的办法不够细致，这导致放射性废物管理资金难以得到有效落实。

针对高放废物和乏燃料后处理，我国《核电站乏燃料处理处置基金征收使用管理暂行办法》[28]规定，核电厂要按照规定缴纳乏燃料处理处置基金。该基金属于国家基金，纳入核电厂发电成本，并按“收支两条线”原则纳入中央财政预算进行管理。该基金涵盖了乏燃料后处理及高放废物深地质处置的研发、建设、运行、改造和退役的费用，但是对于乏燃料后处理和高放废物处置资金的划分没有明确规定；其管理、使用和长期的收取标准修正方法以及基金的保值增值办法还有待明确。

按照法律规定，核设施的退役费用和放射性废物的处置费用应当预提，纳入投资概算或生产成本。法律授权由国务院财政部门、价格主管部门会同相关部门规定退役和处置费用的提取和管理办法，但我国至今没有出台明确的法规或管理办法。这导致无法对核电厂的退役费用进行评估与报告，也未对预提资金的管理方式、充分性、风险管理等问题进行详细规定。我国少数核电站有外资股份，如果不在运行阶段提取退役资金，一旦到达核电站寿期，届时运行许可证注销，外资撤离，退役资金将无法得到保障，可能会引发一定的退役风险。

针对中、低放废物处置，我国尚没有正式发布的废物处置收费标准，也没有相应的收取、管理、监督和使用办法，处置场建设资金的筹措也无政策规定，这些有待明确。

放射性废物处置场的选址、建设、运营过程中，会面临“邻避效应”的问题，我国也像其他国家一样，正面临着这个问题。我国甘肃省政府于2015年颁布了《甘肃省辐射污染防治条例》，建立了“乏燃料和放射性废物处理处置生态补偿制度”[27]。但国家层面上还缺乏完善的激励措施与方法，以应对“邻避效应”的问题。

3 问题讨论与经验启示

3.1 高放废物与低放废物在特性上存在明显差异，对其处置的方式也不同

高放废物放射性活度占各类废物总活度的绝大部分，放射性持续时间长、核素毒性大且涉及国防安全，其处置要求高且难度大，经费需求多，还需开展基础研究和技术开发，通过市场机制难以解决高放废物的处置问题，一般属于国家责任。高放废物体积占比小，对其进行管理的人工需求小，也方便国家集中控制管理。因此，各国对于高放废物的处置，都设立了由政府或政府所属部门专门成立的具有商业性质的实施机构进行管理。

低放、极低放废物体量大、来源广、危害相对较

低、处置技术相对成熟，并且涉及国防安全问题相对少，可采用政府监管下的市场运营模式进行管理。国际上对于低放废物管理模式可分为两类：① 由政府或政府所属部门专门成立的实施机构进行管理，采用商业付费模式。该模式一般适合国土面积小，废物产生来源单位相对集中的国家。② 运营商承包模式。该模式相对灵活，适合国土面积大，废物产生来源单位多的国家。

3.2 低放废物处置政策存在多种途径且各有优劣

（1）“区域处置”。优点是离废物产生地距离相对适中且能够实现区域资源优势共享。但是，该途径下形成的“区域处置”联合体难以作为责任主体，会导致处置场选址、建设和运营的责任不明确，难以有效追责；且在遇到“邻避效应”问题时，地方政府和公众的利益缺乏有效的协调机制，将导致处置场落地困难。

（2）“就地处置”。选址、建设和运营处置场的责任主体明确为废物生产者，可以在短期内推进处置场的建设；并且，处置场可以建在核设施场址内，无明显“邻避效应”问题。但是，核设施单位只处置自身产生的废物，需要建设的放射性废物处置场较多，且核设施寿命有限，可能远远短于废物处置监护周期，从长期和全局角度分析，不利于经济性和资源优化，更带来了新的安全和社会风险。

（3）“集中处置”。利用规模效应，可有效降低成本和风险。场址选择范围大，可充分利用市场机制推动处置场的落地，地方政府和公众的权益可以交由废物生产者、处置设施运营商去沟通。但是，该途径下可能会导致额外的运输安全风险和成本增加，此模式下选址、建设和运营处置场的动力取决于能否实现盈利。

美国低放废物采用的是多途径处置方式：一方面鼓励协议州区域处置方式，另一方面也支持全国性商业化集中处置方式。从过去的经验来看，美国全国性商业化集中处置方式处置了大部分的低放废物。法国国土面积与我国四川省在同等级别，其只有一家核电运营商，故由ANDRA将中低放废物和极低放废物集中处置，以提高处置执行的效率。

3.3 不同类型放射性废物的资金筹措与管理存在差异，受到多重因素的影响

考虑到高放废物和核设施退役产生的放射性废物管理长期性和对社会环境、公众安全的潜在影响，为避免将这些成本转移给后代或整个社会，保证废物生产者在履行未来核责任时有足够的资金，通常会预先征收或准备退役资金。决定征收或准备方式的主要影响因素，除了受到特定国家的国情影响，如核电运营商的数量、废物的来源途径与规模等，还与未来资金使用的实施主体、存续周期和使用频度密切相关。

（1）高放废物和核退役产生的废物。国际上针对高放废物和核退役产生的废物，资金的管理方式一般有 4 种，即企业内部准备金、独立于企业资产的专门账户、不属于国家财政预算范畴的国家核废物基金、属于国家财政预算范畴的国家核废物基金[29]。各国根据自身国情的差异，制定不同的高放废物和核设施退役资金筹措和管理办法。例如：美国高放废物资金采用的是“国家预算内”核废物基金方式，核退役资金管理采用独立于企业资产的专门账户；法国高放废物和核退役废物管理资金都采用企业内部准备金管理方式等。对于资金保值的方法，各国都趋向于采用相对保守的投资方式，如购买国债、特定信用评级的资产或控制风险投资的比例。① 针对高放废物，实施主体一般为国家所属机构，资金存续周期特别长，使用频度比较低。各国对高放废物资金管理的方式差异较大，但可以看出与该国核电运营商的数量、废物的来源途径与规模有较大关系。② 针对核退役产生的放射性废物，实施主体一般为企业，存续周期相对高放废物要短，使用的频度在处理处置过程中相对高。对于核退役

资金管理主要采用企业主导的资金管理方式。因为核退役阶段实施的主体责任仍是企业，如果资金采用由国家主导的管理方式，企业还需要反复与国家沟通资金的使用，过程中资金使用的频度也会比较高，这将给国家带来很大的负担。

（2）低放废物。其资金使用时间与废物产生时间间隔较短，可采用商业付费模式。例如：美国处置设施运营商根据各自定价标准向废物生产者收费；法国是废物生产者与ANDRA签订商业合同并付费；英国NDA通过商业协议授权低放废物库有限公司LLWR管理国家低放废物处置场并支付其运营费用。

3.4 制定适当的激励措施对有效消除“邻避效应”问题作用明显

出于安全、经济、政治等原因，公众反核或“邻避效应”问题严重阻碍了各国放射性废物处置的推进。公众视放射性废物处置设施为一个安全性未知的垃圾填埋场。这些设施增加了公众对环境和健康的风险感知和政府的监管压力，却没有为当地政府或居民带来明显的效益，因而遭到抵制。从各国解决“邻避效应”问题的成功经验看，制定激励措施可明显进行改善，提高公众接受度，加快放射性废物处置进程。

3.5 完善的法律、法规、标准体系对促进放射性废物管理的成效明显

完善的法律、法规、标准体系是放射性废物管理工作的基本依据。法规标准体系对于责任划分、实施方式、资金保障、公众参与和激励措施等方面规定越明确，具体实施的过程就越顺畅。反之，如果对于实施的方向没有相对清晰的界定，会导致工作推进遇到困难。从各国放射性废物管理的经验来看，它们对于放射性废物管理法规、标准体系的制定高度重视，尤其是在立法体系中关键的法律制定方面，大部分国家都制定了针对放射性废物管理的专门法，甚至部分国家针对放射性废物管理制定了多部法律。

4 对我国放射性废物处置的建议

4.1 设立专门的中、高放废物处置实施机构

高放废物处置属于国家责任，国家应依法设立专门的高放废物处置实施机构，主要职责是处置库的选址、建设、运行、关闭和监测工作。建议该实施机构由政府相关部委直接设立，授予较高层级。参考各国经验，该专门的实施机构应具备开展商业活动的能力，人员规模可按实施需求进行实时匹配。实施机构的经费来源与“污染者付费”的原则保持一致，主要来自放射性废物生产者缴纳的费用。我国的中放废物（尤其是长寿命中放废物）处置采用中等深度处置方式，其性质与高放废物较为类似，建议统一由该实施机构进行管理。

我国需加大先进核能创新力度，使中、高放核废物产生最小化甚至实现不产生中、高放核废物。2001年，由美国牵头，联合英国、法国、日本等9个国家发起了第四代核能系统国际论坛（Generation IV International Forum），从安全性、经济性、可持续性和防核扩散能力方面指明了第四代核能系统的发展要求。我国依托自主创新，在第四代核能系统研发方面已跻身世界先进水平。作为核能大国，我国应进一步梳理和思考核能发展的未来方向，提出由我国主导的革新核能系统思想。例如，基于“从源头确保核安全”的基本理念，进一步强化和细化核能系统安全性、经济性、可持续性和防核扩散能力的要求，鼓励核能系统朝更灵活、更多样、更智能的方向发展。可初步定义为第五代核能系统（简称“核5G”）的革新概念，为发展先进核能系统开辟新的途径和思路。

4.2 开放低放废物处置的市场竞争

对于低放废物的处置规划，考虑到其体量大、来源广、危害相对较低、技术相对成熟的特点，其处置的责任主体应为生产者，而国家主要负责监管规划。

不应局限于“区域处置”模式，鼓励多途径开放竞争，“集中处置”模式也可纳入备选方案。发挥市场在资源配置中的作用，鼓励适度的市场竞争，有利于提高放射性废物管理行业的效能，实现优胜劣汰，更加经济便利。

4.3 完善放射性废物资金筹措与管理办法

我国从2010年就开始征收核电站乏燃料处理处置基金（0.026元/千瓦时），建议对乏燃料基金进行专户管理，并对乏燃料后处理和高放废物处置资金进行明确划分，制定基金的保值增值投资方向。可参考美国的管理办法，通过投资国债以达到一定的回报率，并对其管理、使用和长期的收取标准修正方法进一步规范。

考虑到退役的实施主体是核电企业，我国核电厂退役资金建议采用企业主导的资金管理方式，但必须是独立且受监督的账户。国家要制定退役准备金的估算、提取、管理及使用办法，规定该资金不得用于任何其他目的；并由核电公司承担资金从提取到使用期间的投资增值义务，以减轻国家的负担，提高公众对核电安全、环境安全的信心。

我国低放废物的资金保障应尽快制度化。当前，处置场的建设资金可由核电公司分摊，或由商业处置单位自行筹款建设，并依据其建造、运行和关闭监护各环节的成本估算，制定相应的收费标准，定期与核电公司签订处置协议。在形成制度保障的前提下，强化市场竞争，加速推动低放废物的处理处置。

4.4 提高公众参与，完善激励措施，尽力消除“邻避效应”

要从根本上预防“邻避效应”：① 完善处置设施选址过程的信息公开和公众参与制度。具体途径可以参考国际上成功的先进经验，如公众调查、举行听证会、媒体或网络途径等。在国家、当地政府与公众之间建立平等信任的互动关系，从而获得选址所在地政府和公众的认可。② 对于放射性废物处置设施可能产生的外部环境影响，要建立恰当的激励措施，保证地方政府权利和义务的对等，保障当地居民对其居住地的合法权益。明确规定激励措施的支付者、受益者和管理者，具体激励标准与激励方式应由废物生产者、废物处置场运营商与处置地所在社区协商确定，保证激励措施的法制化、科学性、民主性和透明性。③ 完善退役设施的保险制度和不动产价值保证制度。维护处置设施周围居民的切身利益，同时促进放射性废物管理者提高环境保护意识，增强对设施的管理，从而消除当地社区和公众对选址的抵触心理，解决“邻避效应”。

4.5 完善放射性废物管理的法律法规，制定放射性废物管理专门法

在我国当前的法律法规体系中，放射性废物管理的原则是清晰的，但是在处置责任、实施方式、资金保障、公众参与和激励措施方面，还要进一步地明确和细化。为了保障政策在实施过程中有法可依，有章可循，应尽快建立健全相关法律体系，制定专门的放射性废物管理法，使放射性废物管理规范化、制度化，最终实现放射性废物的有效、安全处置。放射性废物管理专门法的立法可能需要长期的过程，故对现行相关法律的有效落实也非常关键，我国在此方面还亟待加强。例如，《核安全法》和《放射性污染防治法》规定了处置选址规划、核设施退役和处置费用的具体管理办法等，但还存在落实不到位的情况。

致谢 本工作得到生态环境部辐射源安全监管司和FDS凤麟核能团队其他成员的大力支持。

参考文献

1 国家核安全局. 中华人民共和国放射性污染防治法. [2003-06-28]/[2019-12-18]. http://nnsa.mee.gov.cn/zcfg_8964/fg/fl/201501/t20150121_305479.html.

2 国家发改委. 核电中长期发展规划（2005—2020年）.

[2006-03-22]/[2019-12-18]. https://so.ndrc.gov.cn/s?siteCode=bm04000007&token=&qt=%E6%A0%B8%E7%94%B5%E4%B8%AD%E9%95%BF%E6%9C%9F%E5%8F%91%E5%B1%95%E8%A7%84%E5%88%92.

3 国家核安全局. 中华人民共和国国家核安全局2018年报. [2019-05-31]/[2019-12-18]. http://nnsa.mee.gov.cn/.

4 郭喜良, 孙庆红, 谷寸礼. 放射性废物管理的法规标准. 辐射防护通讯, 2009, 29(2): 34-41.

5 中核战略规划研究总院. 美国核设施退役及放射性废物治理相关管理机构. [2016-08-05]/[2019-12-18]. http://www.atominfo.com.cn/report/rp_info.aspx?url=69.

6 中核战略规划研究总院. 法国核设施退役及放射性废物治理法规体系与政策. [2016-10-25]/[2019-12-18]. http://www.atominfo.com.cn/report/rp_info.aspx?url=85.

7 罗上庚. 法国的放射性废物管理活动. 辐射防护通讯, 2002, 22(5): 38-41.

8 ASN. France Sixth National Report on Compliance with the Joint Convention Obligations-Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2017.

9 Canadian Nuclear Safety Commission. Canadian National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2017.

10 NRA. National Report of JAPAN for the Sixth Review Meeting-Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2017.

11 JAEA. Annual Report Japan Atomic Energy Agency 2017 Aiming for Energy That Leads to the Future. Vienna: IAEA, 2017.

12 Department for Energy and Climate Change. The United Kingdom's Fifth National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2014.

13 The Korea Radioactive Waste Agency. Radioactive Waste Management in Rep. of Korera. Gyeongju-si: KORADS, 2014.

14 WNA. Nuclear Power in South Korea. [2017-01-23]/[2019-12-18]. https://world-nuclear.org/gallery/maps/nuclear-power-plants-in-south-korea.aspx.

15 State Atomic Energy Corporation Rosatom. The Fifth National Report of the Russian Federation on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2017.

16 DOE. Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste. [2013-06-06]/[2019-12-18]. https://www.energy.gov/em/downloads/strategy-management-and-disposal-used-nuclear-fuel-and-high-level-radioactive-waste.

17 王旭东, 陈式. 美、英、法对放射性废物的监督管理及其借鉴意义// 21世纪初辐射防护论坛第二次会议论文汇编. 太原: 中国核学会, 2003: 57-59.

18 DOE. United States of America Sixth National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2017.

19 ANDRA. Andra and waste disposal. [2008-12-31]/[2019-12-18]. https://www.andra.fr/.

20 The French Nuclear Safety Authority. French National Plan for the management of Radioactive Materials and Waste 2016-2018. France: ASN, 2017.

21 NLF. Annual reports and accounts. [2018-03-31]/[2019-12-18]. http://www.nlf.uk.net/info/.

22 US Nuclear Regulatory Commission. Report on Waste Burial Charges: Changes in Decommissioning Waste Disposal Costs at Low-Level Waste Burial Facilities (NUREG-1307, Revision

15). Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission, 2013.

23 乔亚华, 刘永叶, 叶远虑, 等. 美国放射性废物处置补偿探析. 环境与可持续发展, 2017, 42(2): 48-51.

24 国家核安全局. 中华人民共和国核安全法. [2017-09-04]/[2019-12-19]. http://nnsa.mee.gov.cn/zcfg_8964/fg/fl/201709/t20170904_420856.html.

25 环境保护部, 工业和信息化部, 国防科工局. 放射性废物分类. [2017-11-31]/[2019-12-19]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/t20171212_427756.htm.

26 国务院. 关于印发我国放射性废物环境政策的通知（国发〔1992〕45号令）. [2019-12-19]. http://www.gov.cn/zhengce/xxgkzl.htm.

27 赵永康, 陈晓秋, 常向东, 等. 探索我国放射性废物处置的多种途径. 中国核电, 2019, 12(3): 252-258.

28 财政部, 国家发展改革委员会, 工业和信息化部. 核电站乏燃料处理处置基金征收使用管理暂行办法. [2010-07-12]/[2019-12-19]. http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caizhengwengao/2010nianwengao/wengao6/201009/t20100903_337280.html.

29 董毅漫, 曲云欢, 王晴, 等. 乏燃料处置与核设施退役资金研究. 环境污染与防治, 2013, 35(10): 99-103.

International Experience of Radioactive Waste Disposal Policy and Its Enlightenment for China

WU Yican[1*] ZHAO Yongkang[2] MA Chenghui[3] XU Chunyan[4] WANG Minghuang[1] FU Xuewei[1] ZOU Xiaoliang[1] XIA Fan[1] WANG Fang[1] ZHOU Tao[1] HU Liqin[1]

（1 Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 Northern Regional Office of Nuclear and Radiation Safety Inspection, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China;

3 Southern Regional Office of Nuclear and Radiation Safety Inspection, Ministry of Ecology and Environment, Shenzhen 518034, China;

4 Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100082, China）

Abstract China has formed a comprehensive nuclear industry system, but the radioactive waste disposal capacity cannot keep up with the requirement since more wastes are generated and accumulated. One of most critical challenges is the safety, environmental, and even political issues caused by the overdue storage of radioactive waste. In this study, the radioactive waste management experience in foreign countries, which have high nuclear power installed capacity and rich experience in radioactive waste disposal, has been investigated and analyzed, And then the comparison has been made between these countries and China, in terms of the policy and legislative system, regulatory and implementing, financing and compensation. Finally, the implications on China's governance in the radioactive waste disposal have also been presented in the paper.

Keywords radioactive waste disposal, radioactive waste management, waste disposal policy

* Corresponding author



吴宜灿　中国科学院院士、国际核能院院士。中国科学院核能安全技术研究所所长，兼任国际小型铅基堆联盟主席、国际能源署聚变核技术执委会主席。长期从事核科学技术及相关交叉领域研究，主持国际和国内重大科研项目30余项，出版中英文专著4部，发表论文400余篇。科研成果已在国内外获得广泛应用，获国家自然科学奖二等奖、国家科技进步奖一等奖、安徽省重大科技成就奖，以及美国核学会杰出成就奖、欧洲聚变核能创新奖等重要科技奖励10余项。E-mail: yican.wu@fds.org.cn

WU Yican　Director General of Institute of Nuclear Energy Safety Technology (INEST), Chinese Academy of Sciences (CAS), and the leader of FDS Team. He has been an academician of CAS and an academician of International Nuclear Energy Academy (INEA). He has been serving in the International Energy Agency (IEA), International Atomic Energy Agency (IAEA), International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), Generation IV International Forum (GIF), and Alliance for Small Lead-based Fast Reactors (CASLER). His research interest includes nuclear science and engineering, medical physics and application, computer simulation and software engineering, and other interdisciplinary research. As the project leader or chief-scientist, he has been in charge of more than 30 domestic or international research projects. He has published more than 400 papers in journals and international conferences, including *Nature Energy*, *PNAS*, etc. He has served as the editorial advisory board member in 14 academic journals, and made more than 50 invited talks in international conferences. He has received more than 10 national/international awards, including the Prize of National Natural Science Award, the Prize of China Industry-University-Research Institute Collaboration Innovation Award, the American Nuclear Society (FED) Outstanding Achievement Award, European Prize for Innovation in Fusion Research, etc. E-mail: yican.wu@fds.org.cn

■责任编辑：岳凌生

参考文献（双语版）

1 国家核安全局. 中华人民共和国放射性污染防治法. [2003-06-28]/[2019-12-18]. http://nnsa.mee.gov.cn/zcfg_8964/fg/fl/201501/t20150121_305479.html.

National Nuclear Safety Administration. Law of the People's Republic of China on Prevention and Control of Radioactive Pollution. [2003-06-28]/[2019-12-18]. http://nnsa.mee.gov.cn/zcfg_8964/fg/fl/201501/t20150121_305479.html. (in Chinese)

2 国家发改委. 核电中长期发展规划（2005—2020年）. [2006-03-22]/[2019-12-18]. https://so.ndrc.gov.cn/s?siteCode=bm04000007&token=&qt=%E6%A0%B8%E7%94%B5%E4%B8%AD%E9%95%BF%E6%9C%9F%E5%8F%91%E5%B1%95%E8%A7%84%E5%88%92.

National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Medium- and Long-Term Nuclear Power Development Plan (2005-2020)[2006-03-22]/[2019-12-18]. https://so.ndrc.gov.cn/s?siteCode=bm04000007&token=&qt=%E6%A0%B8%E7%94%B5%E4%B8%AD%E9%95%BF%E6%9C%9F%E5%8F%91%E5%B1%95%E8%A7%84%E5%88%92. (in Chinese)

3 国家核安全局. 中华人民共和国国家核安全局2018年报. [2019-05-31]/[2019-12-18]. http://nnsa.mee.gov.cn/.

National Nuclear Safety Administration. The People's Republic of China National Nuclear Safety Administration 2018 Annual Report. [2019-05-31]/[2019-12-18]. http://nnsa.mee.gov.cn/. (in Chinese)

4 郭喜良, 孙庆红, 谷存礼. 放射性废物管理的法规标准. 辐射防护通讯, 2009, 29(2): 34-41.

Guo X L, Sun Q H, Gu C L. Introduction to the system of laws, regulations and standards on radioactive waste management. Radiation Protection Bulletin, 2009, 29(2): 34-41. (in Chinese)

5 中核战略规划研究总院. 美国核设施退役及放射性废物治理相关管理机构. [2016-08-05]/[2019-12-18]. http://www.atominfo.com.cn/report/rp_info.aspx?url=69.

Strategic Planning Institute of China National Nuclear Corporation. Agencies related to the decommissioning of nuclear facilities and radioactive waste management in the United States. [2016-08-05]/[2019-12-18]. http://www.atominfo.com.cn/report/rp_info.aspx?url=69. (in Chinese)

6 中核战略规划研究总院. 法国核设施退役及放射性废物治理法规体系与政策. [2016-10-25]/[2019-12-18]. http://www.atominfo.com.cn/report/rp_info.aspx?url=85.

Strategic Planning Institute of China National Nuclear Corporation. Laws, regulations and policies related to the decommissioning of nuclear facilities and radioactive waste management in France. [2016-10-25]/[2019-12-18]. http://www.atominfo.com.cn/report/rp_info.aspx?url=85. (in Chinese)

7 罗上庚. 法国的放射性废物管理活动. 辐射防护通讯, 2002, 22(5): 38-41.

Luo S G. Information on management of radioactive waste in France. Radiation Protection Bulletin, 2002, 22(5): 38-41. (in Chinese)

8 ASN. France Sixth National Report on Compliance with the Joint Convention Obligations-Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2017.

9 Canadian Nuclear Safety Commission. Canadian National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2017.

10 NRA. National Report of JAPAN for the Sixth Review Meeting-Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2017.

11 JAEA. Annual Report Japan Atomic Energy Agency 2017 Aiming for Energy That Leads to the Future. Vienna: IAEA,

2017.

12 Department for Energy and Climate Change. The United Kingdom's Fifth National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2014.

13 The Korea Radioactive Waste Agency. Radioactive Waste Management in Rep. of Korera. Gyeongju-si: KORADS, 2014.

14 WNA. Nuclear Power in South Korea. [2017-01-23]/[2019-12-18]. https://world-nuclear.org/gallery/maps/nuclear-power-plants-in-south-korea.aspx.

15 State Atomic Energy Corporation Rosatom. The Fifth National Report of the Russian Federation on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2017.

16 DOE. Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste. [2013-06-06]/[2019-12-18]. https://www.energy.gov/em/downloads/strategy-management-and-disposal-used-nuclear-fuel-and-high-level-radioactive-waste.

17 王旭东, 陈式. 美、英、法对放射性废物的监督管理及其借鉴意义// 21世纪初辐射防护论坛第二次会议论文汇编. 太原: 中国核学会, 2003: 57-59.

Wang X D, Chen S. Experience from the supervision and administration of radioactive waste in the United States, United Kingdom and France// Proceedings of Symposium on Radiation Protection in the Early 21st Century. Taiyuan: Chinese Nuclear Society, 2003: 57-59.(in Chinese)

18 DOE. United States of America Sixth National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2017.

19 ANDRA. Andra and waste disposal. [2008-12-31]/[2019-12-18]. https://www.andra.fr/.

20 The French Nuclear Safety Authority. French National Plan for the management of Radioactive Materials and Waste 2016-2018. France: ASN, 2017.

21 NLF. Annual reports and accounts. [2018-03-31]/[2019-12-18]. http://www.nlf.uk.net/info/.

22 US Nuclear Regulatory Commission. Report on Waste Burial Charges: Changes in Decommissioning Waste Disposal Costs at Low-Level Waste Burial Facilities (NUREG-1307, Revision 15). Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission, 2013.

23 乔亚华, 刘永叶, 叶远虑, 等. 美国放射性废物处置补偿探析. 环境与可持续发展, 2017, 42(2): 48-51.

Qiao Y H, Liu Y Y, Ye Y L, et al. Analysis on compensation of radioactive waste disposal in US. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(2): 48-51.(in Chinese)

24 国家核安全局. 中华人民共和国核安全法. [2017-09-04]/[2019-12-19]. http://nnsa.mee.gov.cn/zcfg_8964/fg/fl/201709/t20170904_420856.html.

National Nuclear Safety Administration. Nuclear Safety Law of the People's Republic of China. [2017-09-04]/[2019-12-19]. http://nnsa.mee.gov.cn/zcfg_8964/fg/fl/201709/t20170904_420856.html. (in Chinese)

25 环境保护部, 工业和信息化部, 国防科工局. 放射性废物分类. [2017-11-31]/[2019-12-19]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/t20171212_427756.htm.

Ministry of Ecology and Environment, Ministry of Industry and Information Technology, State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense of the People's Republic of China. Classification of Radioactive Waste. [2017-11-31]/[2019-12-19]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/t20171212_427756.htm.(in Chinese)

26 国务院. 关于印发我国放射性废物环境政策的通知（国发〔1992〕45号令）. [2019-12-19]. http://www.gov.cn/zhengce/xxgkzl.htm.

The State Council of the People's Republic of China. Notice on Issuing the Environmental Policy about Radioactive Waste Management in China (〔1992〕45). [2019-12-19]. http://www.gov.cn/zhengce/xxgkzl.htm.(in Chinese)

27 赵永康, 陈晓秋, 常向东, 等. 探索我国放射性废物处置的多种途径. 中国核电, 2019, 12(3): 252-258.
Zhao Y K, Chen X Q, Chang X D, et al. Multi-solutions to the disposal of radioactive waste in China. China Nuclear Power, 2019, 12(3): 252-258. (in Chinese)

28 财政部, 国家发展改革委员会, 工业和信息化部. 核电站乏燃料处理处置基金征收使用管理暂行办法. [2010-07-12]/[2019-12-19]. http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caizhengwengao/2010nianwengao/wengao6/201009/t20100903_337280.html.
Ministry of Finance, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Interim Measures for the Administration of Collection and Use of Fund for Treatment and Disposal of Spent Fuel in Nuclear Power Station. [2010-07-12]/[2019-12-19]. http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caizhengwengao/2010nianwengao/wengao6/201009/t20100903_337280.html.(in Chinese)

29 董毅漫, 曲云欢, 王晴, 等. 乏燃料处置与核设施退役资金研究. 环境污染与防治, 2013, 35(10): 99-103.
Dong Y M, Qu Y H, Wang Q, et al. Study on spent fuel disposal and nuclear facilities decommissioning funds. Environmental Pollution & Control, 2013, 35(10): 99-103.(in Chinese)